

流域圏環境統合モデリング構築に関する基礎的研究

Fundamental Study on Integrated Modeling for Basin-scaled Hydrological and Environmental Dynamics

浜口 俊雄・田中 茂信・角 哲也・鈴木 靖⁽¹⁾・佐藤 嘉展⁽²⁾・竹門 康弘・田中 拓馬⁽³⁾

Toshio HAMAGUCHI, Shigenobu TANAKA, Tetsuya SUMI, Yasushi SUZUKI⁽¹⁾, Yoshinobu SATO⁽²⁾,
Yasuhiro TAKEMON, and Takuma TANAKA⁽³⁾

(1) 日本気象協会

(2) 愛媛大学農学部

(3) 日本たばこ産業(株)

(1) Japan Weather Association

(2) Faculty of Agriculture, Ehime University

(3) Japan Tobacco Inc.

Synopsis

This study proposes an integrated model of basin-scaled hydrological and environmental dynamics including coastal water behavior in two dimensions. We conventionally have runoff, load transfer, water temperature, groundwater, sediment yield/transfer, chemical load yield/transfer, flooding/inundating, transient biomass, coastal water and human-activity effect models in space and time. These ones, nevertheless, were proposed at their appropriate scales, respectively. This research attempts to link them to each other at the common scale in considering the relationships among them. The model proposed herein is an integrated one based on the abovementioned ones with the mutual reactions. It can be proven that the integrated model is interpretively produced with compound effects corresponding to water-related dynamics at river basin scale.

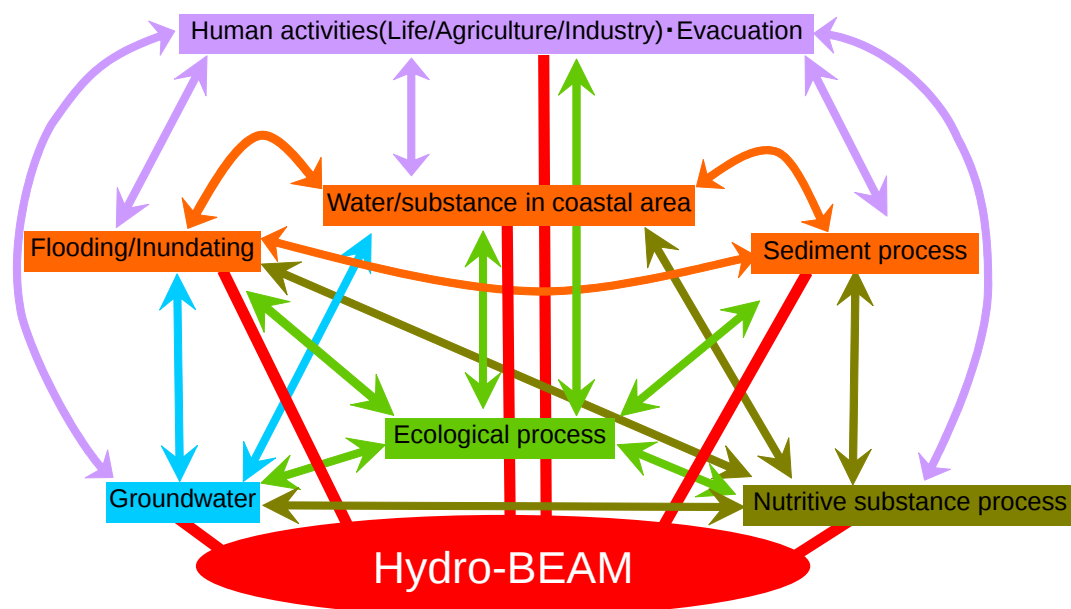
キーワード : 動態モデル, 統合モデル, 流域圏, 流出, モデルスケール

Keywords : Dynamic model, Integrated model, Basin and its coastal area, Runoff, Model scale

1. 序論

流域・沿岸域(流域圏)では, 斜面や河道の水・物質動態, 水温動態, 地下水動態, 土砂動態, 栄養塩動態, 内外水氾濫動態, 生態系動態, 沿岸域の水・物質動態, 人間活動系動態が相互に作用し合う状態にあり, それぞれの環境はそれらの動態に基づき時空間的に変化する. それを一つのシステムで統合化して管理できる Fig.1 のよう

な流域圏環境モデルを構築すれば, すべての動態が他の動態からの影響を受けた状態で一度にモデル解を得られる. 0 ところで過去には, 複数のモデルを同時に数値処理する場合, その計算負荷(コストや時間)を軽減するために動態の挙動順を考えながら順次モデル毎に計算していき, 相互作用部分は先の動態モデル計算結果を近似的に用いるモデル(コンパートメントモデル)を導入することが多かった. しかしながら近年の計算機環境の向上に



Basic structure: Multi-layered distributed runoff model + chemical/ecological environment assessment model

Fig.1 Relationship among component models in basin and coast scale

より，相互作用部分を連成的に扱って計算負荷が増大しても解くということが短時間でも可能となってきた．そこで，上述の流域環境モデルは動態モデルは，最終的には連成的に考えることが可能なものを開発する．これが完成すれば，治水・利水管理面で持続可能な条件の検討が数値的に一手に出来るようになる．

現状を鑑みてみると，上記の各動態モデルの基礎モデル自身はそれぞれ独立的に考案されている．これらはそれぞれの動態が検討できるように，他の動態からの影響は境界条件(外力項あるいは発生・消失項)として与えられていたり，動態挙動が検討しやすいような次元あるいはスケールでモデル化されている．例えば，地下水挙動においても主として水平挙動を把握するために平面2次元化されたものを採用したり，主として重力の影響を受けた挙動を把握するために鉛直2次元化されたものを用いたり，水平と重力の両者を把握するために3次元化されたものを使用したり，と，同じ動態モデルでも目的などによっても次元の異なるモデルが使い分けられることも多い．スケール面でも，水量移動が等価になることを目的として，要求される精度によって50mから1kmまでの解像度から選んだ格子で十分なこともあれば，細部の挙動まで再現把握するために数十cmから50mの範囲で適切に選んだ規則/不規則格子で検討することもある．地下水の場合は，50m以上の平面格子を用いると，(主に透水係数・間隙率や揚水量にも依存するが例えば)揚水の影

響は揚水地点である井戸位置から周囲1～4格子分程度までしか水頭分布変化が顕著に表れず，200m以上の格子を用いれば，観測点の実挙動に対して水量は合わせられるが水頭変化は空間平均の平滑化されたものとしてしか合わせられなくなる．このように各動態は，スケールやモデル次元によってどれが正しく合わせられるかが変わってくるため，スケールやモデル次元の選択は流域のモデル統合化には重要な項目であることが分かる．

本研究では分布型流出モデルを据えて考えるため，その他の動態モデルに対してはスケール面で空間分解能が50mから1kmで適合するモデリングを事前に行う．モデリング概念に矛盾しないように時空間離散化スケールをアップ/ダウンスケーリングで対応することが一般的である．水量に関しては完成形に近い成果として，登坂(2006)は緻密な3次元計算格子で対応し，その利用を想定した統合水循環モデルの利用を提唱している．

当研究では上述のように既存の流出モデルをベースに据え，水動態や水以外の動態もできるだけ従来モデルやそのスケールを活かしつつ，または詳細挙動から導かれたモデルを基に大きな計算格子で対応しうるモデルを開発しつつ，同時に考え得る統合モデルをどのように理論的に考えればよいか，その際にどのように結合していくかを検討する．最終的には，水・物質の各項目動態の追跡を山地分水嶺から河口を経て沿岸域まで空間拡大し，1つの流域圏で物理学的・生態学的・社会的に相互作用

し合う各動態を一手に総合評価できるような統合化モデルの開発を進めていく。

2. 動態モデル

2.1 流出モデル(斜面・河道の水動態モデル)

斜面・河道の水動態モデルにはFig.2に示すような分布型流出モデルのHydro-BEAM(小尻ら, 1997)を考え、これをベースに各動態と関連していく。このモデルの表面流出(表層ならびにA層, 河道の流出)にはKinematic waveモデルが使われている。また中間流出部(B層)ならびに地下水流出部(C層), 地下水非流出部(D層)は線形貯留モデルが採用されているが、本稿では、B層にDagan and Bresler(1983)の提唱する簡便化不飽和浸透流モデルを用いる手法(を)、C・D層には後述の平面地下水モデルを用いる手法をそれぞれ採用する。

比較的勾配のある領域でDynamic waveモデルを近似仮定して簡便化したものがKinematic waveモデルであることから、河道の水動態が下流の平野部の解析領域に到達した場合、Kinematic waveモデルではモデルとして適さない。ただし、河道経路やその河道断面を事細かに入力していくような詳細サイズの河道モデリングは対象としないため、Dynamic waveモデルそのものを採用せず、Diffusive waveモデルを採用することを考える。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_L \quad (1)$$

$$Q = \frac{1}{n} \left(\sin \theta - \frac{\partial h}{\partial x} \cos \theta \right)^{\frac{1}{2}} A^m \quad (2)$$

ここに、 x :河道流向方向の座標、 t :時間、 A :河道流積、 Q :河道流量、 h :水深、 q_L :横流入量+河道への降雨量(川幅が広くて降雨が無視できない程大きい場合に)、 n :等価粗度、 θ :河床勾配、 m :manning 則定数である。特に本研究は流域圏を対象にするため、河川が海と接した

沿岸域も考慮しなければならない、従って、河口付近から上流までの河道はすべて同モデルで処理するものと考えた方がよい。境界条件としては、河口部水位が海拔0mとなるような河口部水深値を与える。

2.2 水温モデル

Hydro-BEAMには河道の物質動態モデルや水温動態モデルがすでに組み込まれている。水温モデルに関しては、地中の恒温層(日本は12-14m深度)が年中変化無しで年平均水温に等しいことを利用する。現存の様々な地下水水温測定結果からもD層(地下水層)が恒温層であると考えても妥当であると考えられる。地中水温 T_g は地中温度と等しいと仮定したとき、

$$T_g = T_0 + W \exp\left(-z \sqrt{\frac{\pi}{\chi T}}\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - z \frac{\pi}{\chi T}\right) \quad (3)$$

で与えられる。ここに、 T_g :深度 z での地中水温(度)、 T_0 :年平均水温(度)、 W :地表面温度 T_s の時系列変化を正弦関数に近似したときの振幅、 τ :周期(day)=365、 χ :地中での熱拡散率 $0.04\text{m}^2\text{d}^{-1}$ である。

式(3)を用いて、各層からの流出量とともに水温を求め、流出水温とともに都市・水田水温を加えて河川水温を算定する。

$$c_w \rho_w h \frac{\partial T_r}{\partial t} = H_0 + \frac{c_w \rho_w}{A} \sum_i q_i (T_i - T_r) \quad (4)$$

ここに、 c_w :水の比熱(=1.0)、 ρ_w :水の密度 $1.0 \times 10^6 (\text{g m}^{-3})$ 、 h :平均水深、 T_r :河川水温(度)、 H_0 :単位面積あたりの水面熱収支量、 A :流積、 q_i : i 番の流入流量、 T_i : i 番の流入水温(度)である。流入項は、A~C層からの流出、表面流(地表と同温)、下水、用水、下水処理水である。この河道に熱収支計算を行って河道の水移動とともに水温遷移を求めていく。

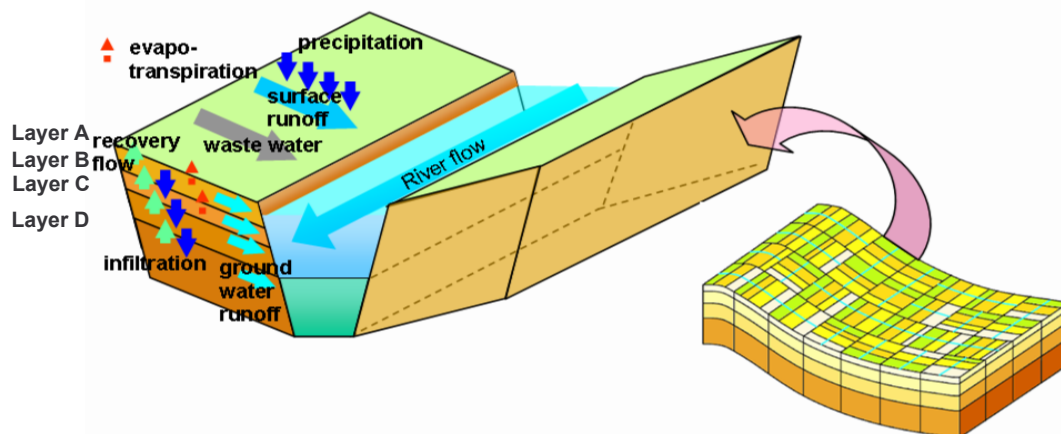


Fig.2 Schematic view of Hydro-BEAM

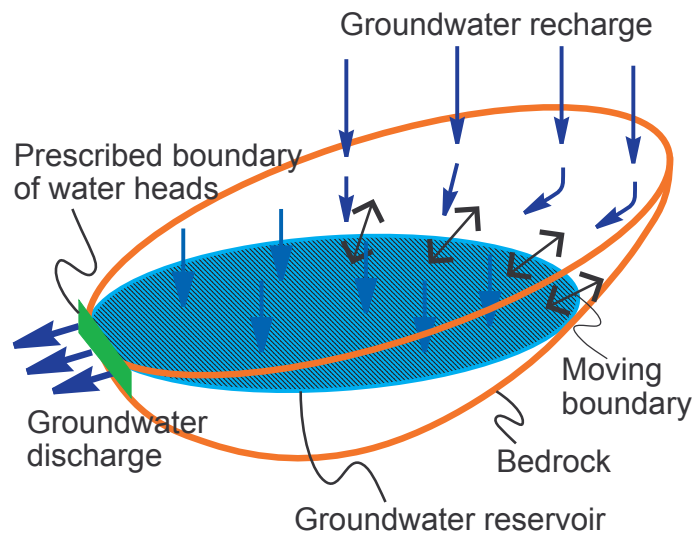


Fig.3 Generalized Groundwater flow model

2.3 物質動態モデル

河道の物質輸送は溶質性物質の移流分散モデルである。

$$\frac{\partial Ac}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AD \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \frac{\partial (vAc)}{\partial x} + \delta \quad (5)$$

ここに、 A : 流積, c : 対象物質の溶質濃度, x : 流向方向の座標, D : 分散拡散係数, v : 河道断面平均流速 ($=Q/A$), δ : 単位長さあたりの対象物質の発生 (横流入) / 消失 / 沈降 / 浮上量である。

物質生産に関しては、河道への物質流入量 (流達負荷量) が A 層から出水時に供給されるものと考え、斜面に残存する負荷量とともに収支を考えて算定する。詳細は参考文献 (小尻ら, 2006) の 4.3 章をご覧ください。最終的には計算セルサイズに集約された物質生産モデルの開発を検討する予定で、現在積分的な理論展開を行い、考察中である。

2.4 地下水動態モデル

浜口によって開発された流域スケールの地下水動態モデル (浜口ら, 1997) は Fig.3 のように、従来貯留域だけで定義されていた平面地下水モデルを、数学的な工夫から非貯留域 (水深 0 の不飽和域) にまで数式表現を拡張し、平面的ながら地下水面端部では、与えられた地下水涵養量が増減することで傾斜した不透水層 (基岩層) に沿って端部水面が上下動とともに水平動も行うことが出来る移動境界モデルとなっている。そのため、時々刻々貯留域が変化していく様を流域全体で考察できる。このモデルを一般化地下水流動モデルと呼び、 $C \cdot D$ 両層に対して利用可能であると思われる。詳細は参考文献 (T. Hamaguchi, 1998) をご覧ください。同モデルは既に数式化ならびにプ

ログラム化されており、先述の Dagan and Bresler モデルによる地下水涵養過程モデルとともに Hydro-BEAM の B 層以深の地下層部の置き換えを予定している。この置き換えの最大のメリットとして、現状の線形貯留モデルという流量等価の概念モデルに対して、表面流同様にメッシュ平均的ながら鉛直ならびに水平の不飽和浸透流動という物理挙動をモデル化できている点が挙げられる。

2.5 土砂動態モデル

土砂動態は、斜面の生産動態と河道の輸送動態に分かれ、さらに同輸送動態は掃流砂輸送・浮遊砂輸送・ウォッシュロード輸送に分類して考えることになる。掃流砂・浮遊砂モデリングに関するモデリングの詳細は参考文献を参照されたい。これは元来流出モデルの数値解析よりも小さな格子サイズを挙動を見ることを想定したモデルであるため、パラメータ値がメッシュ平均になってしまうことや積分すると微量量扱いになってしまうため考慮の影響が薄れる項があることに留意しなければいけない。同文献に掲げていないウォッシュロードのモデリングに関しては、河床沈降のない微細径が対象で SS にほぼ等しく濃度輸送で考えればよい。ため、河道物質動態とほぼ同じ扱いでよいと考えられる。したがって、式 (5) により表現される。ただし同式中の c はここでは SS 濃度と見なせばよい。

土砂生産動態は降雨などの物理的影響を詳細に考慮すれば、離散化スケールで計算セル以上に詳細な考察が必要となるが、流域規模が大きくなると設定処理が肥大化するため、現状は計算セルサイズに見合う物理 (降雨強度や勾配など) 影響として現在は統計経験モデルの USLE 式

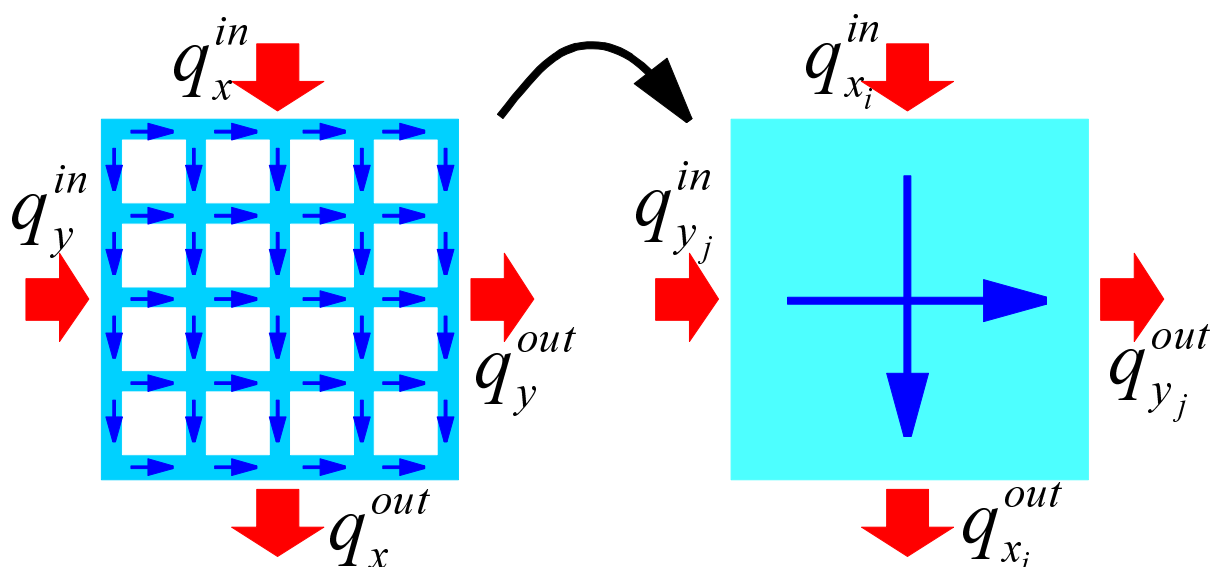


Fig.4 要素集約型氾濫水伝播モデルの概要

で対応している。ただし、これも河道への溶質性物質生産動態と類似した挙動として物理的に表現できると期待し、同類似挙動をベースに理論展開とともに現在鋭意検討中である。溶質性物質生産過程と最も異なるのは、降雨が土層内で掃流を引き起こして対象物質が生産されるのに対して、土砂生産過程は降雨が浸食を引き起こして生産される点にある。これは降雨強度、降雨量、地質、土層内湿潤量などに大きく左右されるため、この点をモデリングしていく必要がある。

土砂生産に関しては特に豪雨災害時の斜面崩壊なども考慮せねばならず、斜面安定の算定モデルも必要になると考えられる。実際に考慮すべき斜面が計算格子内に数ヶ所あるため、これを集約的に安定解析するのは難しい。ここは新たなモデリングを作成すべく、現在鋭意検討している。

これらのモデリングが完遂した上で計算セルサイズに集約された土砂生産モデルの開発を検討する予定である。

2.6 栄養塩動態モデル

栄養塩動態も斜面の物質動態と同じく生産と河道輸送の各動態に分かれ、輸送動態はHydro-BEAMの物質動態として組み込まれ得る。ただし、栄養塩は特定物質のような点源からの供給ではなく降雨時の面源からの供給となり、生産過程が一般の物質動態における面源条件でのものに限られる。それ以外の動態過程は生産動態も物質動態の生産過程に同じモデリングでよいと考えらる。そのため、ここでは先述の物質動態モデルをもって説明が完遂していると思われ、繰り返しを避けてこれ以上詳細は述べない。

2.7 内外水氾濫動態モデル

内外水氾濫動態は、氾濫域にスポットを当てた解析であれば高解像度の格子利用とそれに見合う詳細な解析設定により現状対応できるモデルは多数存在する。なかでもRRIモデルなどのDiffusiveモデルでの河道との一体化またはDynamicモデルでの河道と一体化で氾濫算定するモデルは氾濫解析に対して有効であると有力視されている。その状況であっても、本研究ではスケールのには上記と逆の発想で、洪水ならびに氾濫水の平面挙動が流出モデルと連成しやすいように流出解析と同じスケールで考え得るものを採用する。これは既存の平面氾濫モデルや上述の河道流出一体化モデルとは一線を画し、家屋などの氾濫水が流れない面積分も考慮しているモデルであって、大きなスケールも含めて任意サイズの格子上で、水量移動が等価であるように導出できる。そのモデリングの特徴から道路情報や空き地情報は使わずに、家屋面積占有率だけで計算する要素集約型の氾濫水伝播モデル(Fig.4)である。そこでは、同時に一般化平面地下水モデルと同手法で地盤高を参照しながら氾濫域を平面的に時々刻々変化させる定式化およびプログラム化もなされている。詳細に関しては参考文献(浜口ら,2011)を参照いただきたい。

2.8 生態系動態モデル

生態系動態は、食物連鎖並びに生物濃縮の過程まで考慮したバイオマス動態を検討することで河道での動態が表現できる。食物連鎖を示したモデリングとして、湖沼のCASM-Suwaモデルをベースに、河川でプランクトンが淀みやダム湖以外に居ないことなど河川に適合させて提案されたCASM-Riverモデル(藤原ら,2009)による

時空間展開モデリングを用いる。

また、PBPモデルを用いて、魚の肝臓などに溜まる汚濁負荷の生物濃縮も評価できるモデリングも用意して、Hydro-BEAMに組み込まれている(小尻ら,2006)ため、流域全体の食物連鎖とそこで生じる生物濃縮が分布的に評価できる。

2.9 沿岸域の水・物質動態モデル

沿岸域の水・物質動態は、Hydro-BEAMと沿岸海洋モデルを直結し、平面的に河川水が海に流れ込むモデリングが水温やSSの挙動との連成とともに出来ているもの(鈴木ら,2012)がモデリングされ、検証されている。ここでは沿岸域の解析が三次元で行われており、河口からの流出動態が平面解析結果であることもあり、沿岸域の挙動を平面モデル化するなどの単純化を行わないと、全体を一体化して解析するのは難しい。現在その単純化を目指して検討中で、完遂すればHydro-BEAMに対応させる予定である。

2.10 人間活動系動態モデル

人間活動系動態は、利水(上水・農水・工水)の利用影響や温水の排水などの水量・水質モデリング、土地利用の時空間変動のモデリング、それらと人口密度の分布動態モデル、などを行う予定であるが、現状本動態のモデル化は未完成の状態にある。また、先述の氾濫モデルを用いて、個人避難ではなく家族単位あるいは住居ブロック単位での避難に単純化して、氾濫解析と同時に避難を検討できるシステムをHydro-BEAMに組み込むことを検討している。

3. 結論

モデル概念の時空間スケール共有化や連成事項の定式化が重要であり、Fig.1からも窺える様に複数の動態が複雑に絡み合っているため、それぞれ独立した複雑な動態モデルを連成的に結合させていくには更なるモデル再構成と同時結合作業の時間が必要である。今回は内容的に不十分ではあるが、大きな課題に取り組んでる現状報告として、ここに記すものである。

参考文献

小尻利治・黒田良人・東海明宏(1997): GISベースでの水環境シミュレーションと環境評価モデルの開発, 第5回地球環境シンポジウム公演集, pp.209-214。

小尻利治・和佐守紘・川口智也(2006): 複数化学物質の動態を考慮した流域水・生態環境評価モデルの構築に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第49号, pp.701-715。
鈴木 靖・佐藤嘉展・道広有理・本間基寛・Sergey M.Varlamov(2012): 流域圏統合モデルによる伊勢湾への河川水の影響評価, 京都大学防災研究所年報, 第55号, pp.511-517。

登坂博行(2006): 地圏水循環の数理, 東京大学出版社。
浜口俊雄・村上 章・長谷川高士(1997): 平面解析で移動境界を考慮した地下水モデルと逆解析への応用, 土木学会論文集, 第568号/III-39, pp.133-145, 1997。
浜口俊雄・川久保愛太・小尻利治・Sina Nasouhi・中北英一(2005): 広大な乾燥地帯を対象とした表面流・地下水流連成解析の問題点と打開策, 京都大学防災研究所年報, 第48号, pp.823-832, 2005。

浜口俊雄・小尻利治・Mukta SAPKOTA(2011): 分布型流出モデルと統合化可能な内・外水氾濫マクロモデルの開発, 京都大学防災研究所年報, 第54号, pp.673-681, pp.501-509。

浜口俊雄・田中拓馬・小槻峻司・田中賢治・峠 嘉哉・安部雅宏(2012): 分布型流出モデルに沿ったマクロスケールでの土砂生産・輸送モデリングの基礎的研究, 京都大学防災研究所年報, 第55号, pp.501-509。

藤原寛太・小尻利治・川口智也(2009): 食物連鎖と流域水循環を考慮した生態評価モデルの構築, 京都大学防災研究所年報, 第52号, pp.781-794。

Dagan, G. and Bresler, E. (1983): Unsaturated Flow in Spatially Variable Fields, 1. Derivation of Model of Infiltration and Redistribution, *Water Resour. Res.*, Vol.19, No.2, pp.413-420.

Hamaguchi, T. (1998): Studies on inverse problems relating to design for underground dam through new modeling for groundwater flow with moving boundaries, Doctoral dissertation, Kyoto University.

(論文受理日: 2014年6月11日)